

文章编号: 1001-1455(2003)05-0054-00

# 多跨薄壁压力管道侧向冲击破坏的实验研究\*

路国运, 雷建平, 武勇忠, 张善元

(太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 对三跨连续压力管道侧向受平头、半球头及锥头弹体冲击破坏进行了实验研究, 获得了不同工况下的临界破坏速度及相应的破坏模式, 实验过程中测量并记录了薄壁圆管的变形、冲击力时程曲线及内充液体的压力变化。实验结果表明, 内充介质的存在极大地降低了临界破坏速度, 同时临界破坏速度随内充介质压力的增加而减小。

关键词: 固体力学; 临界穿透速度; 压力管道; 冲击; 穿透

中图分类号: O347.2

国标学科代码: 130·1565

文献标志码: A

## 1 引言

由于军事上的需要, 板壳结构的穿甲问题已有许多研究。近年来由于诸多生产部门的需要, 金属圆管在中低速弹体冲击下的破坏成为冲击动力学领域非常关注的问题之一。由于影响其临界穿透速度的因素很多, 如圆管和弹体材料性能与几何尺寸以及冲击方向、边界条件等, 弹体对管状结构的冲击作用涉及几何非线性、材料非线性、局部变形与结构整体变形的耦合作用, 对于内充介质的管道又涉及管壁与内充介质的耦合, 很难用一个简单的力学模型对这一过程给出合理的描述, 目前对这类问题的研究基本局限于实验研究。X. Q. Ma 等<sup>[1]</sup>认为管内充水及沙加强了管壁刚度并分散了部分冲击能量, 介质的存在提高了管的初始断裂的临界速度且临界速度随内充介质密度的增加而增加; 而 A. J. Neilson 等<sup>[2]</sup>的研究表明, 充水钢管的临界穿透速度比内空管低的 25%, 内压变化不会对穿透速度产生显著影响。李珠<sup>[3]</sup>进行了内充高压液体钢管受弹体侧向冲击破坏的实验研究和理论分析, 发现内充液体会使管的临界穿透速度下降, 且随内充压力增高, 临界穿透速度降低, 弹体冲击凹陷区域减小。N. Jones 等<sup>[4]</sup>对 54 个内空和充气钢管试件进行了冲击实验研究, 实验发现在冲击点处破坏和支承处撕裂两种破坏模式, 分别对应于较低临界能量与较高临界能量: 第一种破坏模式的临界能量几乎与内压无关, 临界能量随着内压的升高略有降低; 而第二种破坏模式的临界能量随内压的增加明显减小。问题的复杂性使得在不同的实验条件下所得结论不尽相同。文献[1]中采用球形弹体冲击薄壁短钢管, 弹体质量仅 1~8.35g, 文献[2]中则采用多种弹体形式对壁厚 7.2~18.2mm、长 1.8m、外径 150mm 的钢管进行实验, 弹体质量 1.7~54.2kg, 冲击速度 46~325m/s, 而文献[3]中实验内充的是气体, 弹体是楔形的。这些差异表明弹体质量、管的跨度、壁厚、内充介质、冲击速度等对临界穿透速度及管的变形模式都产生影响。

为了更真实地反映工程管网的支承条件和工作状态, 本文中完成了三跨的空管和充水压力管道侧向冲击破坏的实验研究, 充水圆管预加工作内压分别为 0.5、10 和 15MPa, 弹头形状分别为平头、半球头、和锥头。实验中, 观察了不同的破坏模式, 记录了冲击力和内压的变化过程, 获得了内充介质和介质压力对临界冲击速度的影响规律。

## 2 实验装置及实验内容

冲击实验在太原理工大学应用力学研究所自行研制的 DHR-9401 型落锤式冲击加载试验机<sup>[5]</sup>上

\* 收稿日期: 2002-10-10; 修回日期: 2003-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(10072036); 山西归国留学基金项目(2000-26)

作者简介: 路国运(1973—), 男, 博士研究生。

进行,如图 1 所示。刚性支架和用于钢管两端的钢制内芯由不锈钢做成,在钢管左端的内芯上安装 CY-YD-205 型石英压力传感器,右端的内芯为注水加压口,外接水压泵,在内芯做两道凹槽分别安装两个橡胶密封圈,固定在刚性支架上通过螺母压紧,以防止在实验过程中水和压力泄漏。5115 型力传感器安装在落锤和弹体之间,两个传感器测得的信号经 YE5852 电荷放大器放大,再输入 TDS420A 数字存储示波器记录冲击力及内压力的变化。

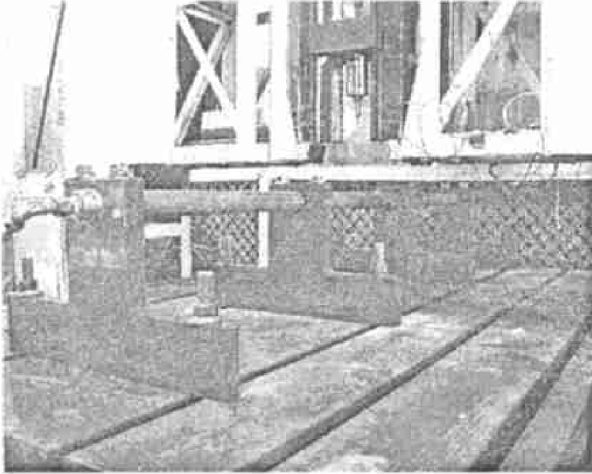


图 1 冲击实验装置

Fig.1 Sketch of impact test

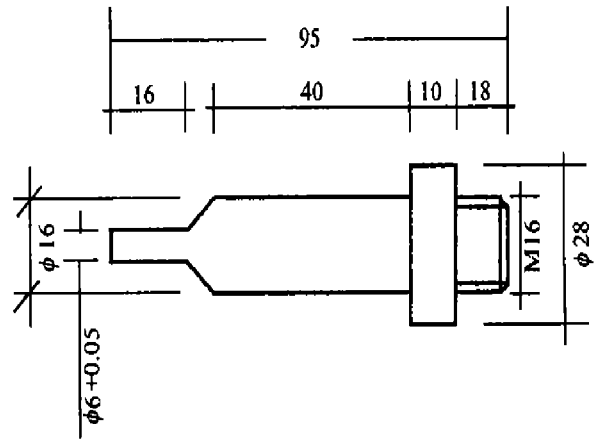


图 2 弹体几何尺寸

Fig.2 Parameters of missile

实验所用试件为结构用无缝钢管,钢材料含碳 0.19%,硅 0.19%,锰 0.56%,磷 0.018%,硫 0.008%,镍 0.030%,铬 0.070%,铜 0.10%。其弹性模量  $E=207\text{GPa}$ ,轴向屈服极限  $\sigma_s=368\text{MPa}$ ,强度极限  $\sigma_b=504\text{MPa}$ ,延伸率  $\delta=27\%$ ,响应地周向各量为:  $\sigma_s=367\text{MPa}$ ,  $\sigma_b=519\text{MPa}$ ,延伸率  $\delta=27\%$ 。试件总长 1.9m,外径 44mm,壁厚 1mm,三跨跨距均为 597mm。在实验过程中当发生穿透破坏的落锤高度的最小值和未穿透的最大值相差 10mm 时,就认为达到临界状态,取两者平均值来确定临界穿透速度和临界穿透能量。实验用弹体由高速工具钢 HSS(W9M03Cr4V)并进行热处理制成,弹头硬度  $h_{RC}=60\sim 64$ ,落锤、力传感器和子弹总重量为 20.175kg。图 2 给出了平头弹体的几何尺寸,球头与锥头弹体仅在头部按半径为 3mm 及  $90^\circ$  锥角变化。实验按弹体形状分为三组,共进行了 103 个试件,其中平头弹体 48 个,球头弹体 37 个,锥头弹体 18 个,实验结束后采用精度为 0.01% 的百分表分别沿周向和轴向测量了钢管局部凹陷区和碟型变形区的变形情况。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 冲击破坏模态

半球形弹体穿透管壁的破坏模态为不完全碟型破坏,属拉伸型破坏,见图 3(a)。在冲击处形成弹头形式的帽状物,其半径小于弹体半径,仍有约 1/4 与管壁相连,帽状物与管相连位置具有一定的随机性,这一现象和 G.G.Corrbet 等<sup>[6]</sup>的实验结果一致。而平头弹体冲击圆管产生与弹体半径大小一致的冲塞片形成剪切型破坏,见图 3(b)。在充水充压情形下,当弹体以临界速度穿透管壁时,在破裂处仅见少许水渗出,管内压力略有下降,之后弹体被管壁夹住压力保持在一稳定值,当弹体以高于临界穿透速度冲击穿透管壁时,钢管内液体从开口处向四周喷射,钢管内压随之迅速下降,弹头缓缓滑入管内。

图 4 所示是球头弹在临界穿透速度下冲击空管和充水钢管的破坏模态。由图可见,内空管的碟形凹陷区(俯视)呈椭圆形,其长短轴之比约在 5:2 左右,充水充压钢管的局部凹陷区近似为圆形,随预加工作内压的增高,碟型变形区的扩展范围减小而且也越近似于圆形。平头弹体亦有同样变化趋势,只是变形区比球头的小,长短轴之比约在 4:2。钢管管壁的变形包括三个部分:弹头与管壁接触作用使管壁形成弹头状隆起,称为局部凹陷;局部凹陷之外几倍弹径范围内管壁变形区,为碟型变形;钢管由于冲击作用产生结构挠度变形。

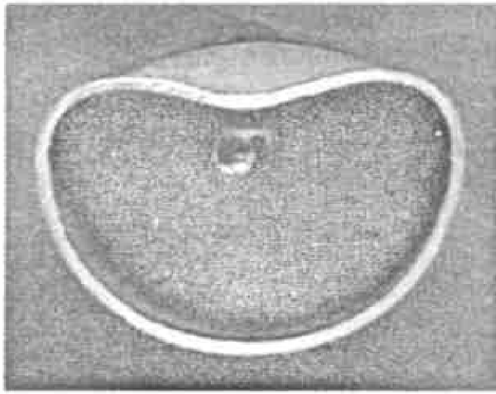


图 3(a) 半球形弹体的不完全碟型破坏模式  
Fig.3(b) Dishing mode formed by hemispherical-nose missile

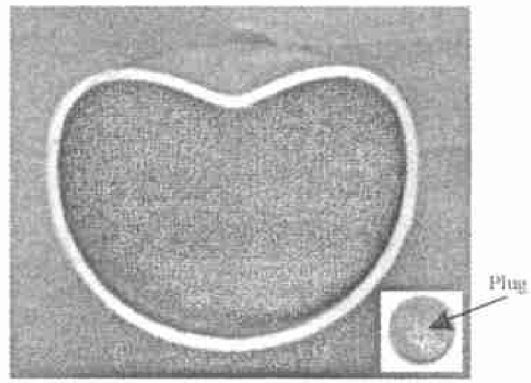


图 3(b) 平头弹体的冲塞型破坏模式及冲塞片  
Fig.3(b) Plugging mode and plug formed by blunt-nose missile

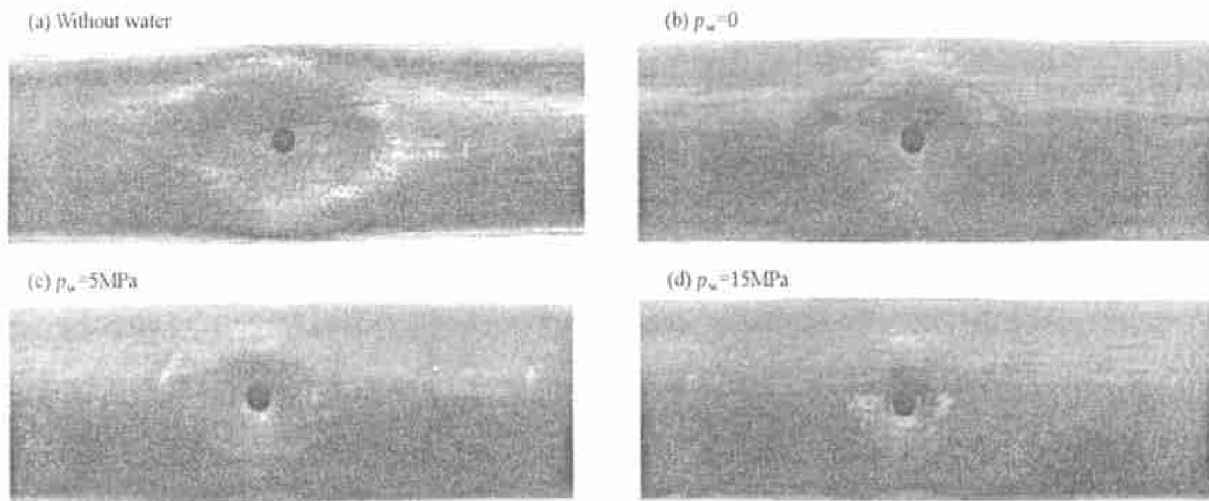


图 4 不同工况下球头弹体冲击钢管的破坏模式俯视图  
Fig.4 Failure figure of tube under different work condition impacted by hemispherical missile

### 3.2 临界穿透速度

在实验各个工况下弹头、传感器及落锤的总质量保持 20.175kg 不变,球头弹体与平头弹体冲击钢管破坏的临界冲击速度和临界穿透能量的实验记录见表 1,  $h_c$  为临界落锤高度。由表可知,管内介质的存在极大地降低了半球形弹体及平头弹体冲击钢管破坏的临界冲击速度。当钢管内注满水,预加工作内压为 0 时,临界穿透能量大幅降低,降幅达 23.7%~29.6%。临界穿透速度随内压力的增加而减小,当预加工作内压大于 10MPa 时,再增加内压则影响甚微。由表还可得到半球形弹体所需临界穿透能量高于平头弹体。

表 1 平头弹体与球头弹体冲击实验临界值

Table 1 Ballistic limit of tube impacted by blunt-nose and hemispherical-nose missile

弹体	$p_w / \text{MPa}$	$h_c / \text{mm}$	$v_c / (\text{m/s})$	$E_c / \text{J}$
平头	空管	405	2.82	80.07
	0	285	2.36	56.35
	5	225	2.10	44.49
	10	195	1.95	38.55
	15	185	1.90	36.58
半球形	空管	645	3.56	127.53
	0	495	3.11	97.26
	5	425	2.89	83.51
	10	385	2.75	76.12
	15	385	2.75	76.12

### 3.3 冲击力及内压的变化

表 2 给出了各工况在临界冲击能量下的最大冲击力及其作用时间,从表中可以看到,随着内压的增大,冲击作用时间缩短。由图 5 给出的冲击力时程曲线可知同一工况下球头弹体以临界冲击速度作用的最大冲击力要比相应的平头弹体的大,但在冲击作用初期则是平头弹体的冲击力比球头弹体的高。

图 6 给出了冲击作用时管端部内压力变化的时程曲线,由图可知在临界穿透速度冲击下,球头弹体引起更大的内压力变化。实验中半球头弹体冲击管时对应于 0.5、10、15MPa,管内压力增幅分别为 2.33、1.09、0.52、0.25MPa。由此可知管内充压力越大则冲击作用引起的管内压力的增加越小。由于管内压力较大时冲击所成的碟形凹陷较小(图 4),可推断管内压力的变化大部分是由于管壁碟形凹陷变形引起。

表 2 平头弹体最大冲击力及冲击作用时间

Table 2 Max impact force and the duration of response

弹体	$p_w$ /MPa	$F_{max}$ /kN	$t$ /ms	弹体	$p_w$ /MPa	$F_{max}$ /kN	$t$ /ms
平头	空管	4.847	12.3	半球形	空管	5.438	13.6
	0	5.047	10.2		0	5.725	12.8
	5	4.835	8.5		5	5.829	10.8
	10	4.965	7.9		10	5.975	9.1
	15		6.0		15	5.966	9.0

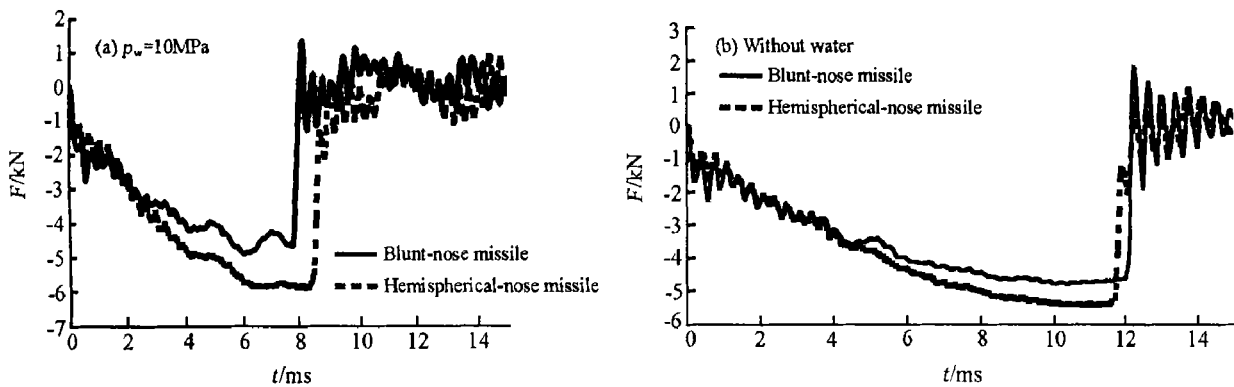


图 5 钢管受不同弹体临界穿透速度冲击时冲击力时程曲线

Fig.5 Time history of impact force of tube at ballistic limit under different condition

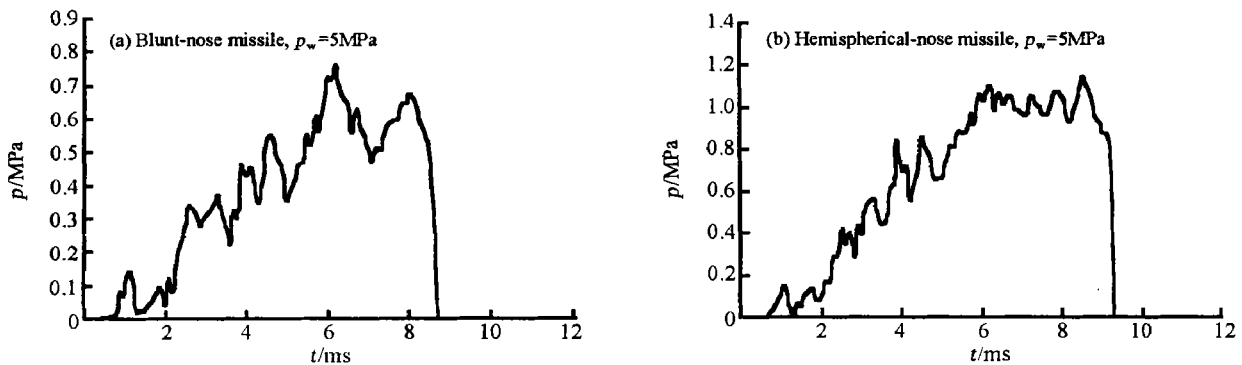


图 6 不同弹体冲击圆管时内压时程曲线

Fig.6 Time history of pressure

### 3.4 锥头弹体冲击实验结果

90°圆锥头子弹冲击钢管的实验共进行 18 个。当冲击速度较大时锥头弹体以花瓣形式穿透管壁,沿管壁的周向有明显的撕裂性裂纹。冲击破坏模态见图 7。在很小的冲击能量下锥头尖部就可将本实验中采用的薄壁管刺一个小孔发生破坏,所以在实验中未找到锥头弹体的临界值。这可能是由于实验所采用的管壁太薄,在冲击处未能产生一个大的接触区,管壁即已经被弹体尖部刺穿,若采用厚管结果可能会不同。

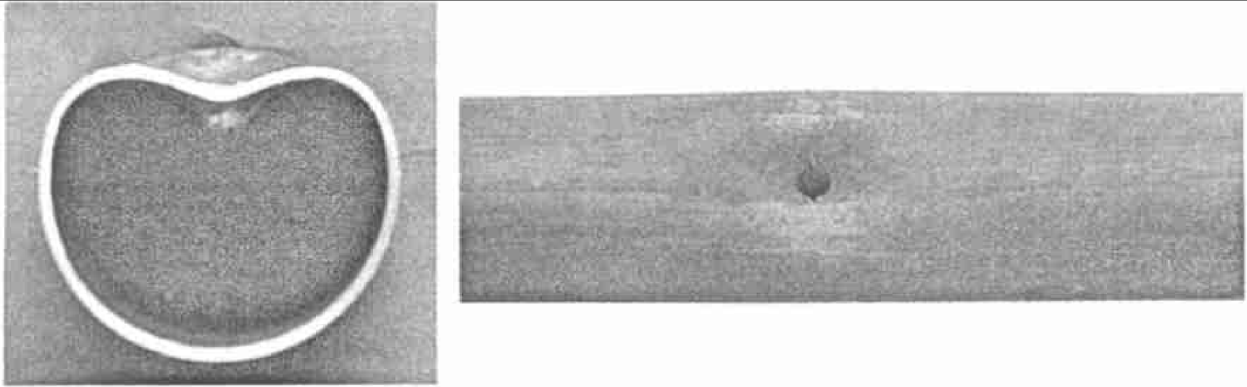


图 7 锥头弹体的花瓣型破坏模态

Fig.7 Failure mode of tube impacted by conical-nose missile

## 4 结论与讨论

本项实验得到主要结论如下:

(1)不论在何种工况下平头弹体冲击钢管发生剪切冲塞型破坏,半球形弹体发生不完全碟型破坏。在同一工况半球形弹体冲击钢管产生破坏所需的临界能量要比平头弹体的高。

(2)钢管内充不可压缩介质使得临界冲击穿透能量降低。对于半球形弹体,子弹穿透空管所需的临界穿透能量比充水钢管(预加内压为 0)高 23.7%。对于平头弹体,子弹穿透空管所需的临界穿透能量比充水钢管(预加内压为 0)高 29.6%;这一数值与 A.J.Neilson 等的结论在同一范围。

(3)临界穿透速度随内充压力的增加而减小,当预加内压力达到一定值时再增加压力对临界穿透速度影响不大。内压的存在还减小了钢管管壁凹陷区的塑性变形及弹体的侵彻时间。空管的碟型变形区为椭圆形,充水钢管的碟型变形区近似为圆形且影响区域比内空时小。

实验给出了内充压力对临界速度的影响趋势,而 A.J.Neilson 认为内压的变化不会对穿透速度产生显著影响。这可能是由于本实验采用的钢管几何尺寸、冲击速度及支承条件与其不同,而内充压力对只有 1mm 厚的管壁产生的膜力作用对破坏的影响也不容忽视。这些差异说明了这一问题的复杂性,内充介质及内压对管的临界破坏速度的影响趋势及作用机理仍需要丰富实验资料及深入理论分析。

### 参考文献:

- [1] Ma X Q, Stronge W J. Spherical missile impact and perforation of filled steel tubes[J]. *Int J Impact Eng*, 1985, 3:1—16.
- [2] Neilson A J, Howe W D, Garton G P. Impact resistance of steel pipes: An experimental investigation[R]. UK Atomic Energy Authority Report AEEW-R2125, Winfrith, 1987.
- [3] 李珠. 内充高压液体钢管受弹体侧向冲击破坏的实验研究和理论分析[D]. 太原:太原理工大学博士论文, 2000.
- [4] Jones N, Birch R S. Influence of internal pressure on the impact behavior of steel pipelines[A]. Nishioka T. The 1995 Joint ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference[C]. 1995:99—119.
- [5] 张善元, 雷建平. 落锤冲击加载实验装置及结构耐撞性实验研究[J]. *力学与实践*, 1996, 18(5):51—53.  
ZHANG Shanyuan, LEI Jianping. Experiment research of drop rig and structure crashworthy[J]. *Mechanics and practice*, 1996, 18(5):51—53.

- [6] Corbett G G, Reid S R, Al-Hassani S T S. Static and dynamic penetration of steel tubes by hemi spherically nosed punches[J]. *Int J Impact Eng*, 1990, 9(2): 165—190.

## Experimental research on failure of multy-span thin-walled pressure pipelines impacted by projectiles

LU Guo-yun<sup>\*</sup>, LEI Jian-ping, WU Yong-zhong, ZHANG Shan-yuan

(*Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China*)

**Abstract:** The results of impact test, in which three-span thin-walled pressure pipelines were struck by blunt-nosed, hemisphere-nosed and conical-nosed projectiles, were reported. The tube diameter in this experiment was 44mm and the wall thickness was 1mm. The water pressure in the tube was given respectively 0MPa, 5MPa, 10MPa, and 15MPa. The ballistic limits and the corresponding failure modes under different conditions were acquired. The deformation of the tube and the time histories of the impact force and the change of the water pressure were measured and recorded. Experiments show that the water filled in the tube reduced the ballistic limit significantly and with the increase in the pressure of water the ballistic limit decreased smoothly.

**Key words:** solid mechanics; ballistic limit; pressure pipelines; impact; perforation

---

\* Corresponding author: LU Guo-yun

E-mail address: luguoyun@tyut.edu.cn; Telephone: 0351-6010560